6A

УДК 004.896.006.1(204.1)

Т. Акинфиев, А. Апальков, М. Армада
Центр автоматики и робототехники (CAR UPM-CSIC), г. Мадрид, Испания
teodor@iai.csic.es

Автономный робот для взятия проб воды

В статье рассматривается новый автономный робот для взятия проб воды. Целью работы является разработка робота, способного брать пробы воды с заданной глубины с высокой точностью позиционирования, в частности, для случая взятия проб вблизи поверхности водоема. Корпус робота, состоит из двух частей, верхней и нижней, которые связаны зубчатым ремнем. Для увеличения точности позиционирования используются специальные датчики.

Введение

В настоящее время взятие проб воды для химических или биологических анализов с определенной глубины водоема осуществляется с корабля [1], [2]. При этом оператор вручную или с помощью подъемного крана опускает в воду емкость для взятия проб воды и на определенной глубине с помощью дополнительного троса открывает эту емкость и закрывает ее после заполнения емкости водой. При таком подходе в качестве точки отсчета используется палуба корабля, что приводит к значительным ошибкам в определении реальной глубины, с которой берется проба воды. Такие факторы, как приливы и отливы, качка корабля, ошибки в определении длины троса и т.д., могут создавать погрешность в определении глубины порядка нескольких метров. Особенно критична такая ошибка в том случае, когда требуется взять пробу воды на малом расстоянии от поверхности водоема.

Дополнительный недостаток такого метода состоит в том, что для взятия проб воды в разных точках необходимо осуществлять перемещение крупногабаритного корабля между этими точками и его остановку в требуемых точках. Это приводит к большим затратам топлива и, как следствие, к высокой стоимости каждой пробы воды.

Использование известных автономных подводных аппаратов (типа миниатюрной подводной лодки [3], [4]), у которых глубина погружения определяется с помощью датчика давления воды, не дает возможности увеличить точность определения глубины, с которой берется проба воды, из-за влияния на показания датчика давления таких факторов, как приливы и отливы, волны на поверхности воды и изменение атмосферного давления. Кроме того, в момент взятия пробы воды изменяется вес аппарата, что приводит к нарушению равенства веса аппарата и архимедовой силы. Как следствие этого аппарат начинает погружаться, а для восстановления равновесия требуется с помощью системы управления изменять вес или объем аппарата, однако из-за возникающего запаздывания аппарат не остается на той же глубине, что создает дополнительную погрешность в точности позиционирования.

В работе [5] описан робот для взятия проб воды вблизи дна водоема. Этот робот обеспечивает высокую точность позиционирования, но его применение оправдано только в тех случаях, когда глубина водоема составляет 50 – 100 метров.

Целью данной работы является разработка автономного подводного робота, способного брать пробы воды вблизи поверхности водоема в заранее заданных точках с требуемой глубины, обеспечивая при этом высокую точность позиционирования и низкую стоимость проб воды.

Основные принципы конструирования робота

Для снижения стоимости проб воды робот должен иметь возможность работать автономно, перемещаясь от базы (расположенной на берегу или корабле) к точкам взятия проб и обратно без помощи оператора, а также автоматически брать пробы воды в заданных точках, определяя глубину с высокой точностью.

Автономность перемещения робота между заданными точками может быть обеспечена при наличии мотора с гребным винтом и управляемым от системы управления рулем, причем система управления должна содержать блок GPS. Так как антенна GPS не может работать под водой, то робот должен иметь надводную часть (рис. 1).

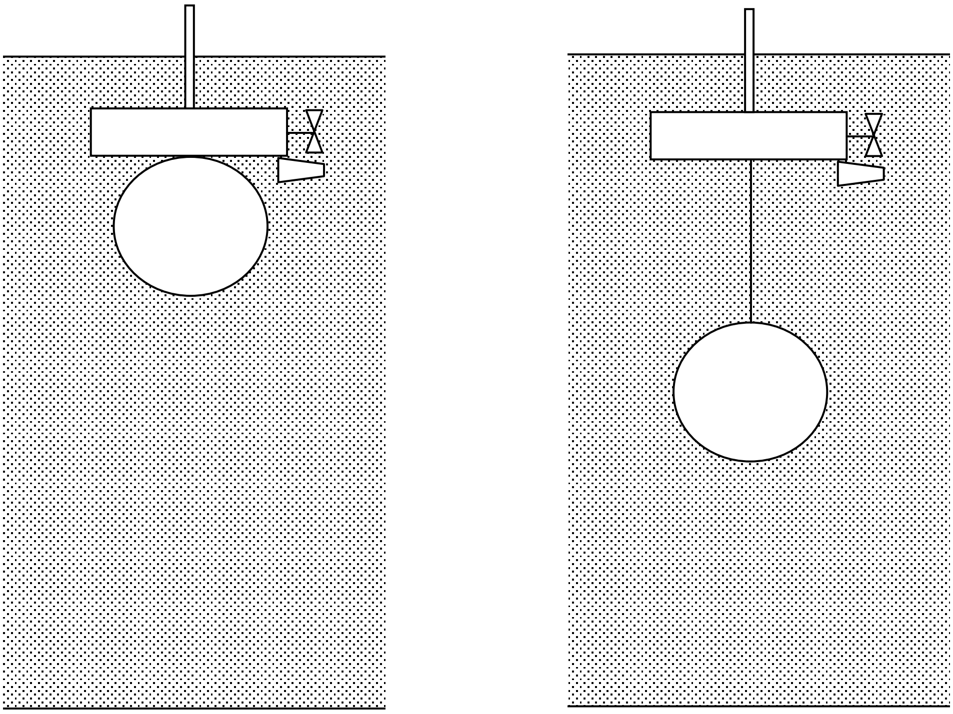


Рисунок 1 – Схема робота в момент движения по поверхности воды (слева) и в момент взятия пробы воды (справа)

Подводный робот [6] состоит из двух частей, связанных гибким нерастяжимым зубчатым ремнем (рис. 2), имеющим устройство изменения эффективной длины этого ремня. В нижней части робота располагаются приемники для проб воды. Робот имеет положительную плавучесть, так что только доля верхней части робота находится над водой. Наличие надводной части позволяет стабилизировать положение равновесия робота. В то же время наличие надводной части робота приводит к тому, что на эту часть действуют возмущающие воздействия. Эти воздействия можно разделить на детерминированные и случайные. Влияние детерминированных внешних воздействий, таких как приливы и отливы, может быть скомпенсировано с помощью системы управления, которая должна содержать данные о приливах и отливах в зависимости от времени. Влияние случайных воздействий, таких как периодические волны на поверхности, скомпенсировано за счет специального дизайна робота. Для этого надводная часть робота имеет малую площадь поперечного сечения. В этом случае робот будет динамически являться апериодическим звеном, способным отфильтровывать внешние периодические вертикальные силы.

Дополнительная особенность робота – способность брать пробы воды без изменения веса робота. Это необходимо для того, чтобы, взяв пробу воды, робот не изменял своей вертикальной координаты. Достигается это специальной конструкцией емкостей для проб и соответствующим алгоритмом управления.

Конструкция робота

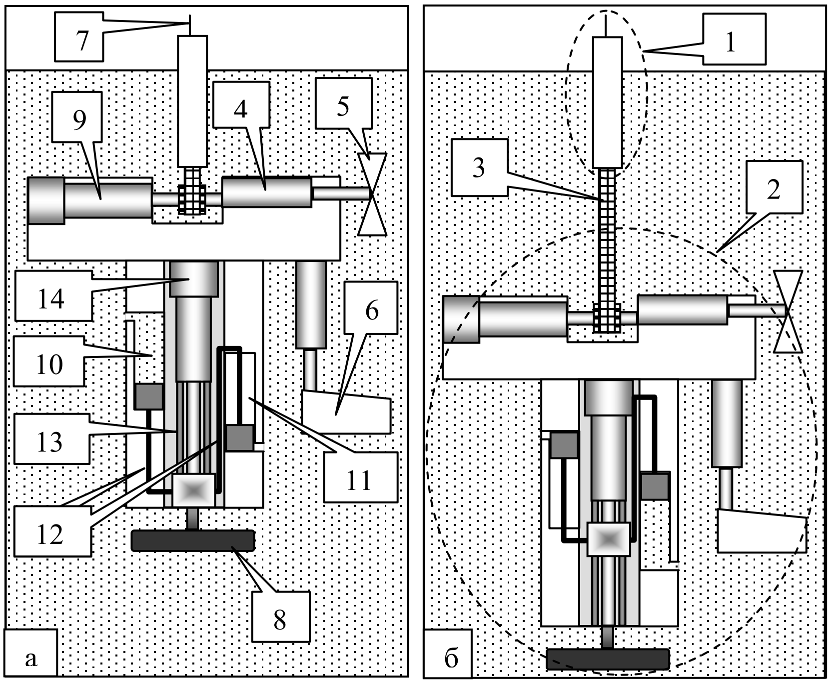


Рисунок 2 – Схема элементов робота

Как уже было сказано выше, корпус робота состоит из двух частей (рис. 2). Верхняя часть 1 имеет положительную плавучесть, а нижняя часть 2 – отрицательную плавучесть. Нижняя часть соединена с верхней частью зубчатым ремнем 3. Весь робот в целом имеет небольшую положительную плавучесть, выбранную таким образом, чтобы некоторая доля верхней части робота оставалась выше поверхности воды. Для выбора подходящей величины плавучести на нижней части робота установлен регулировочный груз 8. На верхней части робота имеется мотор 4 с гребным винтом 5 и управляемым от системы управления рулем 6. Система управления содержит блок GPS, антенна 7 которого находится на самой верхней точке верхней части робота.

При взятии пробы воды масса робота не должна изменяться. В противном случае это может привести к нарушению равенства веса аппарата и архимедовой силы и робот изменит глубину погружения. В нижней части робота расположены две одинаковые емкости для проб, причем одна из них, 10, изначально заполнена водой. Вторая, 11, расположенная параллельно первой, остается пустой. Обе емкости снабжены поршнями, соединенными друг с другом штангами 12, закрепленными на направляющих 13. Вал электродвигателя 14 снабжен резьбовой насадкой, проходящей через штанги 12, имеющие ответную часть. При вращении мотора поршни обеих емкостей начинают перемещаться с одинаковой скоростью. При этом количество воды, выходящей из емкости 10, равно количеству воды, поступающей в емкость 11. Таким образом, масса робота (как и его плавучесть) в процессе взятия проб остается постоянной. Отметим,

что данная конструкция разработана только для лабораторного образца робота. Для промышленного прототипа робота, содержащего большое количество емкостей для проб, разработана другая конструкция. Эта конструкция позволяет, используя только один мотор, последовательно заполнять любое количество емкостей для проб воды без изменения веса и, соответственно, плавучести робота.

Зубчатый ремень 3 связан со снабженным оптическим датчиком угла поворота мотором 9 через специальный шкив. Эффективная длина зубчатого ремня характеризует глубину погружения нижней части робота и, соответственно, ту глубину, на которой в данный момент будет браться проба воды. Оптический датчик угла поворота мотора 9 позволяет системе управления получать информацию об эффективной длине ремня с высокой точностью. Естественно, это возможно только в том случае, когда зубчатый ремень не перескакивает через зуб шкива. Для предотвращения такого перескакивания на верхней части корпуса робота установлен специальный подпружиненный ограничитель (рис. 3), прижимающий зубчатый ремень к шкиву.

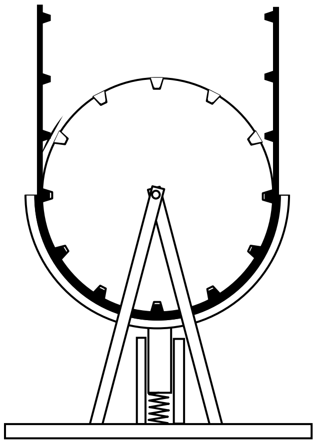


Рисунок 3 – Подпружиненный ограничитель хода зубчатого ремня

Работа робота

Робот работает в двух различных режимах. Первый из них – режим горизонтального перемещения по поверхности воды к точке с заранее заданными координатами, а второй – режим вертикального перемещения нижней части робота и взятия проб воды.

Предполагается, что существует расположенная на берегу или корабле база. Оператор на базе записывает в систему управления робота координаты точек, в которых требуется взять пробы воды и глубину, с которой требуется брать каждую из проб. Кроме того, в случае необходимости, оператор записывает в систему управления координаты промежуточных точек, определяющих траекторию движения робота (рис. 4).

Нижняя часть корпуса робота с помощью зубчатого ремня прижата к верхней части корпуса. Оператор опускает робота в воду. Робот, ориентируясь на сигналы навигатора, с помощью гребного винта и руля плывет по заранее заданной траектории через промежуточные точки к той точке, в которой требуется взять пробу воды. При достижении этой точки с заранее заданной точностью робот останавливается и переходит в режим взятия пробы воды. После завершения этого режима робот по проходящей через промежуточные точки траектории движется к следующей точке, в которой требуется взять пробу воды. Далее процесс повторяется аналогичным образом, а по завершении взятия всех проб воды робот автоматически возвращается на базу, где оператор забирает все взятые пробы воды.

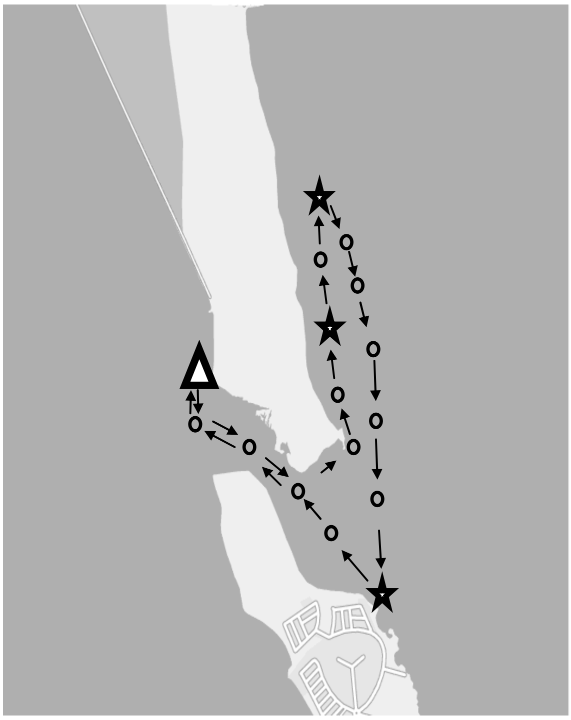


Рисунок 4 – Пример траектории движения робота при взятии проб в нескольких точках. △ – база, ★ – точки, в которых осуществляется взятие проб воды, o – заранее заданные точки, через которые должен пройти робот

Второй режим работы робота – взятие проб воды – осуществляется следующим образом. Робот находится на поверхности воды в той точке, в которой требуется взять пробу воды. Система управления с помощью мотора 9 начинает вращать шкив и таким образом увеличивает эффективную длину зубчатого ремня. При этом нижняя часть робота, имеющая отрицательную плавучесть, начинает тонуть. В тот момент, когда эффективная длина зубчатого ремня, вычисляемая системой управления с помощью оптического датчика угла поворота мотора 9, соответствует той глубине водоема, с которой требуется взять пробу воды, мотор прекращает перемещение ремня и удерживает его в таком положении.

После того, как система управления получила сигнал о том, что нижняя часть корпуса робота находится на требуемой глубине, робот приступает к взятию пробы воды на данной глубине. Для этого мотор 14 начинает перемещать штанги 12 и связанные с ними поршни в сосудах 10 и 11. Поршень в сосуде 10 вытесняет имеющуюся там балластную воду, а поршень в сосуде 11 втягивет забортную воду в сосуд. Таким образом сосуд 11 оказывается заполненным пробой воды, взятой в точке с заданными координатами и с заданной глубины. В том случае, когда необходимо взять пробу воды в той же точке, но с другой глубины, снова изменяют эффективную длину зубчатого ремня и действуют аналогично тому, как и при взятии первой пробы.

Завершив взятие проб воды в данной точке, робот переходит в первый режим работы для перемещения к следующей точке, в которой требуется взять пробы воды. Для перехода в первый режим работы мотор 9 уменьшает эффективную длину зубчатого ремня и прижимает нижнюю часть корпуса робота к верхней части корпуса. После этого робот готов к тому, чтобы начать двигаться к следующей точке, в которой требуется взять пробы воды, или вернуться на базу.

Экспериментальные исследования робота

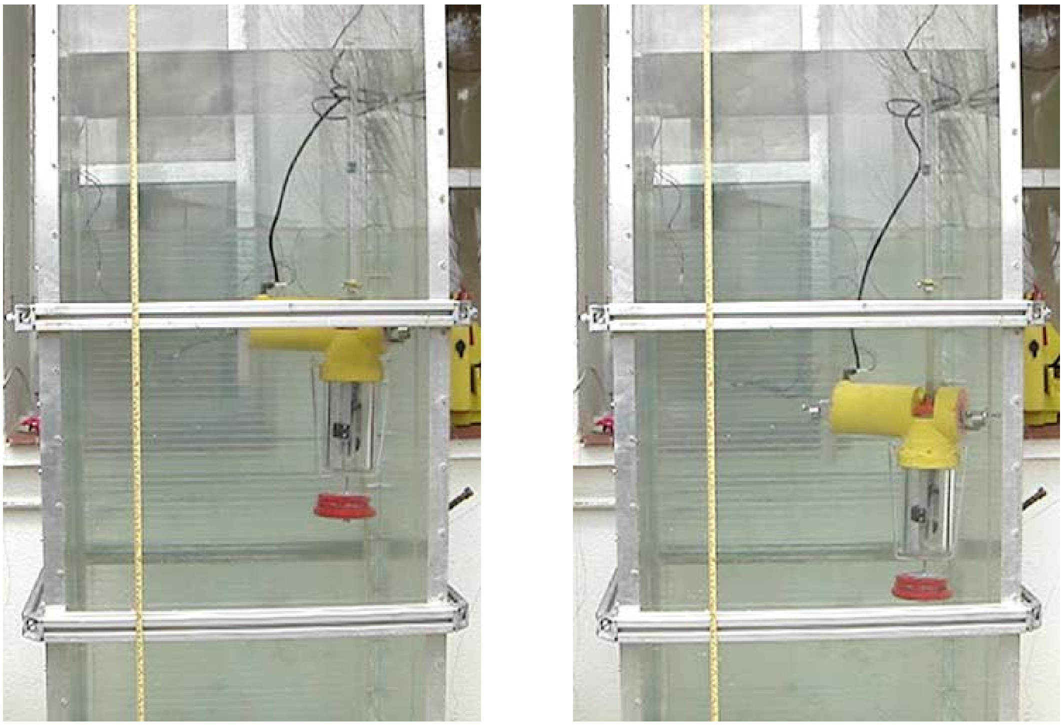


Рисунок 5 – Взятие проб воды с разных глубин

Испытания робота (рисунок 5) проводились в специальном бассейне глубиной 2 метра. В ходе лабораторных испытаний элементов показано, что он может обеспечить точность позиционирования по глубине порядка одного миллиметра. Отметим, что эта точность относится к ситуации, когда процесс изменения эффективной длины зубчатого ремня является квазистатическим, робот находится в стоячей воде, а эффективная длина зубчатого ремня меньше одного метра.

Были проведены специальные эксперименты по изучению влияния волн на поверхности воды на точность позиционирования робота (рис. 6). Показано, что чем меньше площадь поперечного сечения верхней части робота, тем меньше волны влияют на точность позиционирования по вертикали. Так, при выполнении верхней части робота в виде трубки с площадью поперечного сечения 3 квадратных сантиметра, колебания робота по вертикали под действием волн с амплитудой до 10 сантиметров составляли всего несколько миллиметров.

В реальных условиях работы робота в море точность позиционирования по глубине может существенно ухудшиться из-за влияния таких факторов, как зависимость температуры воды от глубины погружения и наличия морских течений, которые могут иметь разную скорость вблизи поверхности и на глубине. Тем не менее, при наличии специальных датчиков соответствующие погрешности могут быть скомпенсированы с помощью системы управления.

Так, наличие морского течения с разными скоростями вблизи поверхности и на глубине, может привести к тому, что не только зубчатый ремень будет иметь некоторый угол наклона, но верхняя и нижняя части корпуса робота также могут иметь небольшой наклон. Это приведет к существенным погрешностям при определении реальной глубины, с которой берется проба воды, особенно в тех случаях, когда эф-

фективная длина зубчатого ремня достаточно велика. Для устранения этого недостатка можно использовать высокоточные датчики угла наклона, связанные с системой управления, которая в этом случае сможет автоматически вносить коррективы и выбирать требуемую эффективную длину зубчатого ремня с учетом возможных наклонов элементов робота. Особенно важно использовать датчик угла наклона зубчатого ремня, но представляется целесообразным использовать также датчики углов наклона верхней и нижней частей корпуса робота.



Рисунок 6 – Изучение влияния волн на точность позиционирования

Изменение температуры воды в зависимости от глубины погружения несколько изменяет эффективную длину зубчатого ремня за счет теплового расширения. Расчеты показывают, что при длине зубчатого ремня порядка нескольких десятков метров реальная длина зубчатого ремня за счет этого эффекта может измениться на величину порядка 1 сантиметра. Для устранения этой погрешности можно использовать связанный с системой управления датчик температуры забортной воды, расположенный на верхней части корпуса робота. Такой датчик позволит системе управления в зависимости от температуры забортной воды вносить корректировку в величину требуемой эффективной длины зубчатого ремня.

Выводы

Разработана концепция нового автономного робота для взятия проб воды. Робот способен автономно перемещаться к заданным точкам и в этих точках брать пробы воды с заданной глубины с высокой точностью позиционирования, что особенно важно для случая, когда пробы берутся вблизи дна водоема. Робот имеет верхнюю и нижнюю части корпуса, которые связаны зубчатым ремнем. В роботе исполь-

зуются как стандартные датчики, так и специально разработанные датчики, которые обеспечивают нормальное функционирование робота с высокой точностью позиционирования. Разработаны новые алгоритмы управления этим роботом.

Благодарности

Т. Акинфиев выражает благодарность Высшему совету научных исследований Испании (CSIC) за финансовую поддержку настоящей работы, А. Апальков выражает благодарность Министерству науки и инноваций Испании.

Литература

1. Encyclopaedia of Ocean Sciences. – Vol. 1. – P. 579-588
2. Woods Hole Oceanographic Institution [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.whoi.edu/page.do?pid=8415&tid=201&cid=422&ct =362 (2009).
3. Technology and applications of autonomous underwater vehicles / Edited by G. Griffiths. – Taylor and Francis Group. – 2003.
4. Novick D. The development of a highly manoeuvrable underwater vehicle / D. Novick, R. Pitzer [et al.] // Robotics 98 : The 3rd International Conference and Exposition/Demonstration on Robotics for Challenging Environments. – 1998.
5. Акинфиев Т. Концепция автономного робота для взятия проб воды / Т. Акинфиев, Р. Фернандес, Армада М. // Искусственный интеллект. – 2009. – № 3. – С. 278-284.
6. Device for sampling of water and method of control of the same. Patent application ES200930093 (2009) / T. Akinfiev, R. Fernandez, M. Armada.

Т. Акінфієв, А. Апальков, М. Армада

Автономний робот для взяття проб води

У статті розглядається новий автономний робот для взяття проб води. Метою роботи є розробка робота, який здатен брати проби води із заданої глибини з високою точністю позиціонування, зокрема, для випадку взяття проб поблизу поверхні водоймища. Корпус робота складається з двох частин, верхньої та нижньої, які зв'язані зубчастим ременем. Для збільшення точності позиціонування використовуються спеціальні датчики.

T. Akinfiev, A. Apalkov, M. Armada

Autonomous Robot for Water Sampling

In this paper a design of a new autonomous underwater robot for sampling of water is considered. The objective of the concept is to create a robot with a possibility of water sampling from certain depth with acceptably high accuracy, especially when it is required to take sample of water in close proximity to a reservoir surface. The robot's body has the top part, the bottom part and a toothed belt connecting them. Sensors fusion is used to increase accuracy.

Статья поступила в редакцию 28.05.2010.